

基于边窗滤波的高动态红外图像压缩增强算法

桑贤侦, 朱鸿泰, 程虎*, 李敏, 胡楷, 唐俊, 郝明东, 袁政

中国电子科技集团公司第五十八研究所, 江苏 无锡 214035

摘要 红外热成像系统采集的数据大都是高动态范围, 为了实现高动态红外图像的可视化, 动态范围压缩和细节增强技术的研究至关重要。针对传统方法存在的梯度反转伪影、低对比度细节丢失、背景噪声过增强等问题, 提出一种基于边窗滤波的高动态红外图像压缩增强方法。首先, 采用边窗滤波将原始红外图像分解为基础分量和细节分量; 然后, 根据基础分量的灰度级分布情况, 设计一种自适应阈值的平台直方图算法, 对基础分量进行压缩; 接着, 利用双边滤波器核权重分布特点, 生成自适应增益系数, 对细节分量进行增强; 最后, 对基础分量和细节分量进行加权融合, 并将结果量化到 8 位动态范围。实验结果表明, 与经典的压缩增强方法相比, 所提方法对强边缘具有更好的保边效果, 可以有效避免梯度反转伪影和光晕问题, 细节信息更丰富, 背景噪声抑制效果更好, 对不同场景的适应性更强。

关键词 红外成像; 边窗滤波; 动态范围压缩; 细节增强; 自适应增益

中图分类号 TP391.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230980

High Dynamic Infrared Image Compression and Enhancement Algorithm Based on Side Window Filtering

Sang Xianzhen, Zhu Hongtai, Cheng Hu*, Li Min, Hu Kai, Tang Jun, Hao Mingdong, Yuan Zheng

No.58 Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Wuxi 214035, Jiangsu, China

Abstract Data collected via infrared thermal imaging systems are primarily in high dynamic range. Thus, research on dynamic range compression and detail enhancement technology is crucial to achieve visualization of high dynamic infrared images. This paper addresses the challenges of gradient reversal artifacts, low contrast detail loss, and background noise over enhancement in traditional methods. In this paper, we propose a high dynamic infrared image compression and enhancement method based on side window filtering. First, side window filtering is used to decompose the original infrared image into basic and detail components. Then, an adaptive threshold platform histogram algorithm is designed based on the grayscale distribution of the basic component in order to compress the basic component. The detail component is enhanced using the adaptive gain coefficient generated via the weight distribution characteristics of the bilateral filter core. Finally, the basic and detail components are weighed and fused and quantified to an 8-bit dynamic range. According to experimental results, compared with classic compression enhancement methods, the proposed method has a superior edge preservation effect on strong edges, can effectively avoid gradient inversion artifacts and halo problems, and has richer detail information, better background noise suppression effect, and stronger adaptability to different scenes.

Key words infrared imaging; side window filtering; dynamic range compression; detail enhancement; adaptive gain

1 引言

红外成像技术广泛应用于航空及民用领域^[1-3], 高质量的红外设备可以适应 50 K 范围温度, 检测 0.01 K 以内的温度差^[4]。红外成像设备采集的图像数据大多

为 12 bit 到 16 bit 动态范围, 而显示设备只显示 8 bit 位宽数据^[5]。为了满足显示设备要求, 需要对红外图像进行压缩, 如果压缩方法不当, 将造成原有信息损失, 例如细节信息丢失、低灰度级目标模糊及过增强噪声产生等^[6]。因此, 对高动态红外图像进行压缩和增强

收稿日期: 2023-03-29; 修回日期: 2023-04-27; 录用日期: 2023-05-04; 网络首发日期: 2023-05-15

基金项目: 湖北省自然科学基金(2021CFB527)、江苏省“双创博士”项目(JSSCBS20211447)

通信作者: *chhu1989@163.com

时,既要压缩高动态范围灰度信息,又要避免低动态范围细节信息丢失。

常见的高动态红外图像压缩增强方法有 3 类:基于映射的方法、基于梯度域的方法及基于分解的方法^[7]。基于映射的方法是通过调整图像中背景和细节信息的直方图统计分布来实现的,该方法增强效果有限,但算法简单、易于实现,广泛应用于工程中。自动增益控制(AGC)方法去除极值后,将动态范围映射到 8 bit^[8]。直方图均衡化(HE)方法利用累计分布函数对强度进行归一化,使灰度强度均匀分布,该方法提升了主要温度范围的对比度,但存在噪声过度增强、细节丢失及冲刷效应等问题^[9]。为了克服以上问题,Vickers^[10]提出平台直方图(PE)方法,利用平台阈值来抑制均匀区域的增强,提升非主要温度范围的对比度,该方法增强效果易受阈值影响。基于梯度域的方法是通过衰减亮度图像中的大梯度幅值实现对红外图像动态范围压缩的,该方法计算量巨大,未能得到广泛应用^[11]。FLIR 公司提出了数字细节增强(DDE)技术,该技术将图像分解为基础分量和细节分量,分别进行压缩和增强处理,再进行融合,从而实现既压缩动态范围又保留细节信息的目标^[12]。由于保密原因,DDE 技术未被公开。基于该思想,Branchitta 等^[13]提出了基于双边滤波的动态范围压缩方法,利用双边滤波将红外图像分解为基础分量和细节分量,采用伽马校正对基础分量进行压缩,对细节分量进行拉伸,再将两者加权融合。该方法在强边缘易产生梯度反转伪影,在平坦区域产生噪声。Zuo 等^[14]在双边滤波后引入自适应高斯滤波,提出了基于双边滤波和自适应细节增强的方法(BF&DDE),该方法在一定程度上能避免梯度反转伪影,抑制噪声,但计算量较大。Liu 等^[15]用引导滤波代替双边滤波来避免梯度反转伪影,提出了基于引导滤波的增强方法(GF&DDE),该方法提升了计算速度,但需要设置参数适应不同场景,自适应能力较差。之后,Chen 等^[16]简化引导滤波计算流程,提出了基于快速引导滤波和平台直方图的增强方法(FGF&DDE),将引导滤波与高斯滤波结合来分解红外图像,利用平台直方图对基础分量进行压缩,采用引导滤波权重系数对细节分量进行增强。该方法提高了引导滤波的计算速度,避免梯度反转伪影,但在一些场景中,该方法处理的强边缘区域存在光晕效应,局部区域对比度较差。目前,对高动态红外图像进行压缩增强的研究都是基于引导滤波来分解红外图像的^[17-18]。

针对现有方法存在的梯度反转伪影、低对比度细节丢失、背景噪声过增强等问题,首先,本文设计保边能力更佳的边窗滤波算法分解红外图像;然后为了提高图像对比度,保留细节信息,设计基于自适应阈值的平台直方图算法对基础分量进行压缩;之后为了增强高频细节,抑制背景噪声放大,设计一种自适应增益算法对细节分量进行增强;最后将处理后的基础分量和

细节分量融合输出。

2 增强算法设计

利用边窗滤波(SWF)将原始图像分解为基础分量,表达式为

$$I_B = \text{SWF}(I), \quad (1)$$

式中: I 为原始图像; I_B 为基础分量;SWF(\cdot)为边窗滤波。细节分量为原始图像减去基础分量的结果,即

$$I_D = I - I_B. \quad (2)$$

基础分量包含大动态范围低频信息,采用基于自适应阈值的平台直方图进行压缩,得到 I_{BP} ;细节分量包含图像小动态范围高频信息,包含边缘细节、纹理以及低对比度目标信息,对细节分量进行自适应增强,得到 I_{DP} 。将两部分加权融合,输出 8 bit 图像数据用于显示,算法流程如图 1 所示。

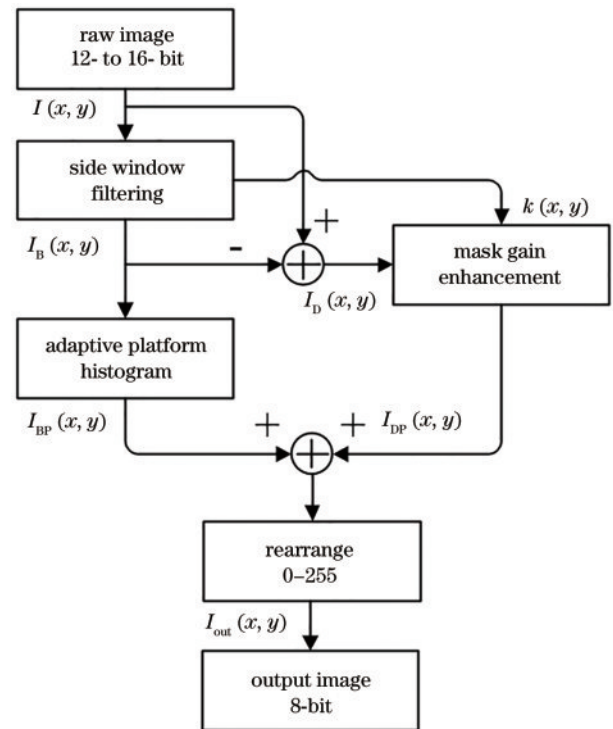


图 1 增强算法流程

Fig. 1 Flow chart of enhancing algorithm

2.1 边窗滤波

为了避免滤波结果受边缘另一侧信息影响,Yin 等^[19]提出了边窗滤波算法,其滤波窗口如图 2 所示。

图 2 中, (x,y) 为待滤波像素点, θ 为滤波窗口与水平方向夹角, ρ 为窗口另一个方向长度, r 为窗口半径。根据定义,点 (x,y) 处的边窗有无穷多个,实际应用中,只使用其中的 8 种窗口,分别为 L、R、U、D、NW、NE、SW、SE,其中 $\theta = \pi/2 \times k, k \in [0, 3]$,并且 $\rho = m \times r, m \in [0, 1]$,如图 3 所示。

结合图 3 中 8 种类型滤波窗口进行分析,在图像低频平坦区域,不同滤波窗口的滤波结果是一致的,而在

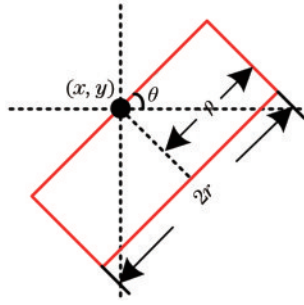


图 2 边窗滤波的窗口

Fig. 2 Window for side window filtering

高频边缘区域,不同滤波窗口的滤波结果存在明显差异。同时,滤波结果也受滤波窗口半径 r 影响, r 越大

滤波效果越平滑。滤波结果除了受滤波窗口的形状和尺寸影响外,也受滤波核权重的影响。采用双边滤波器来设置边窗滤波核权重值,表达式为

$$W(x, y, i, j) = e^{-\frac{|(x-i)^2+(y-j)^2|}{2\delta_s^2}} \times e^{-\frac{|f(x,y)-f(i,j)|}{2\delta_r^2}}, \quad (3)$$

式中: (x, y) 为待滤波像素位置; (i, j) 为滤波窗口中心位置; $f(x, y)$ 为像素点的灰度值; δ_s 为空间域尺度系数; δ_r 为值域尺度系数。当滤波窗口大小为 3×3 、 δ_s 为 7、 δ_r 为 0.3 时,双边滤波器权重为

$$W_{bf} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & w_{13} \\ w_{21} & w_{22} & w_{23} \\ w_{31} & w_{32} & w_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.97 & 0.98 & 0.97 \\ 0.98 & 1.00 & 0.98 \\ 0.97 & 0.98 & 0.97 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

8 种不同边窗的滤波核形式如图 4 所示。

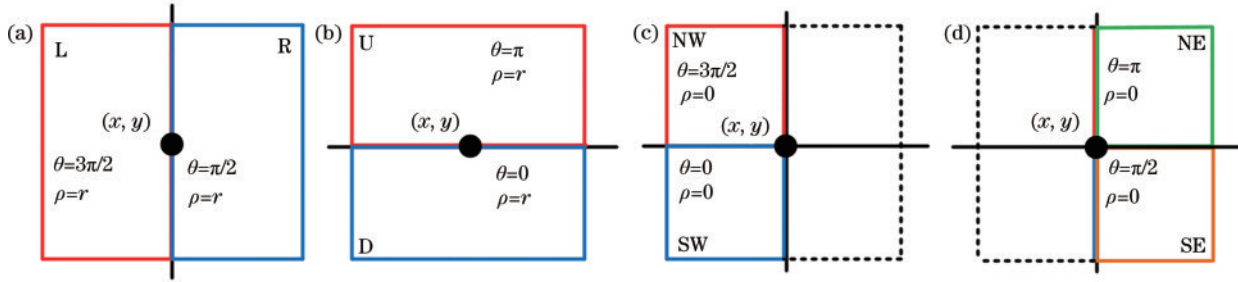


图 3 8 种不同类型的边窗。(a) 左、右边窗; (b) 上、下边窗; (c) 西北、西南边窗; (d) 东北、东南边窗

Fig. 3 Eight different types of side windows. (a) Left and right side windows; (b) upper and lower side windows; (c) northwest and southwest side windows; (d) northeast and southeast side windows

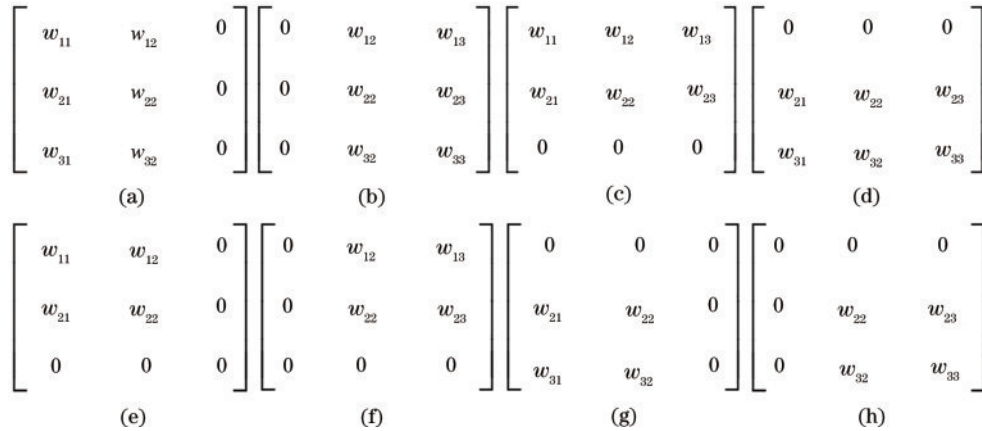


图 4 边窗滤波的滤波核。(a) 左边窗; (b) 右边窗; (c) 上边窗; (d) 下边窗; (e) 西北边窗; (f) 东北边窗; (g) 西南边窗; (h) 东南边窗
Fig. 4 Filtering kernel of edge window filtering. (a) Left window; (b) right window; (c) upper window; (d) lower window; (e) northwest side window; (f) northeast side window; (g) southwest side window; (h) southeast side window

不同边窗滤波后的结果为

$$I_i = \frac{1}{K_i} \sum_{j \in w_i} w_{ij} q_j, \quad (5)$$

式中: I_i 为滤波结果; i 为边窗类型; q_j 为滤波窗口 w_i 内像素点 j 的灰度值; w_{ij} 为边窗滤波器权重; K_i 为边窗的权重之和。

$$K_i = \sum_{j \in w_i} w_{ij}, \quad i \in S, \quad (6)$$

式中: $S = \{L, R, U, D, NW, NE, SW, SE\}$ 表示不同的

边窗。代价函数为

$$E_i = \|q_k - I_i\|_2^2, \quad (7)$$

式中: q_k 为待滤波像素的灰度值。最佳边窗滤波结果为

$$I_m = \arg \min_{i \in S} E_i. \quad (8)$$

结合式(5)~(8)进行分析,边窗滤波的窗口分布在边缘的一侧,有效避免另一侧灰度信息的影响,从而实现保边效果。而常用的保边滤波算法主要有双边滤波和引导滤波,其中,双边滤波是利用边缘点周围的空

间域和值域信息实现保边去噪的^[20],引导滤波是利用引导图解出的局部线性滤波系数达到边缘信息保留效果的^[21]。由于在边缘位置进行滤波时,滤波窗口均引入边缘两侧灰度信息,保边效果要低于边窗滤波。

为了验证所提方法对强边缘具有更好的保边效果,对台阶、斜坡、屋顶边缘的模型图像进行滤波。对滤波后的第 100 行数据进行对比,结果如图 5 所示。在图 5(b)和图 5(c)中,实心圆线为边缘图像第 100 行原始数据,方块线、菱形线、空心圆线分别为双边滤

波、引导滤波、所提方法的滤波结果,从三种边缘滤波结果可以看出,所提方法在边缘位置保边能力最好,更有利于避免梯度反转伪影问题。在高动态红外图像压缩中,双边滤波和引导滤波有一定的保边能力,由于两种滤波器窗口不是边窗形式,在滤波过程中对强边缘两侧的灰度信息进行加权求和,从而对强边缘位置保边效果不好^[14-15],仍然存在梯度反转伪影和光晕问题。

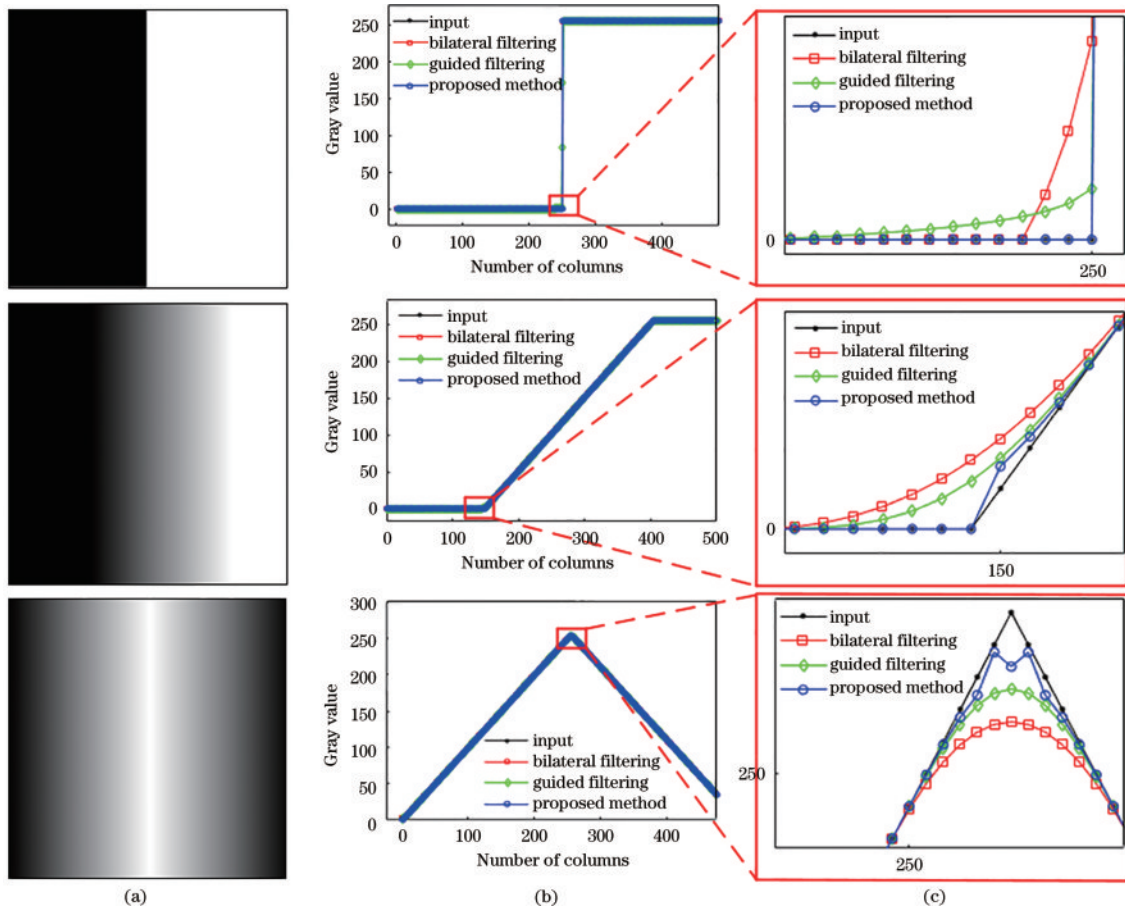


图 5 双边滤波、引导滤波及所提方法的滤波结果。(a) 台阶边缘、斜坡边缘、屋顶边缘模型图像;(b) 图像第 100 行数据及滤波后的数据曲线;(c) 局部放大

Fig. 5 Filtering results of bilateral filtering, guided filtering, and proposed method. (a) Model images of step edge, slope edge, roof edge; (b) curve of data in the 100th line of the image and filtered results; (c) local amplification

对边缘进行滤波时,若滤波效果不保边,强边缘信息将被分到细节分量中,在拉伸增强后,容易出现梯度反转伪影,同时,在细节分量中占据较宽动态范围,也会削弱低对比度细节的增强;若滤波效果比较保边,弱边缘的细节信息不易被分到细节分量中,从而无法对低对比度边缘细节进行增强。因此,最佳的滤波器对强边缘尽可能保边,对弱边缘进行平滑滤波。对 16 bit 红外图像进行滤波处理,结果如图 6 所示。

对于含有强边缘的区域 a 和 c,从图 6(c)和图 6(e)可以看出,所提方法保边能力最好;对于含有弱边缘细节的区域 b 和 d,从图 6(d)和图 6(f)可以看出,所提方

法对强边缘位置保边效果最好,对弱边缘又能进行平滑处理。因此,采用所提滤波方法对原始图像进行分解更有利于后续压缩增强处理。

2.2 基础分量处理

基础分量包含高动态范围的低频信息,需要进行压缩处理。自动增益控制法进行压缩时允许少数极端像素值出现饱和,这可能导致主要温度范围的对比度较低。文献[13]采用直方图投影法进行压缩,该方法能有效保留不同灰度级信息,当少量像素占据较多灰度级时,主要温度范围的对比度较低。文献[14]采用平台直方图进行压缩,可以提升主要温度范围的对比

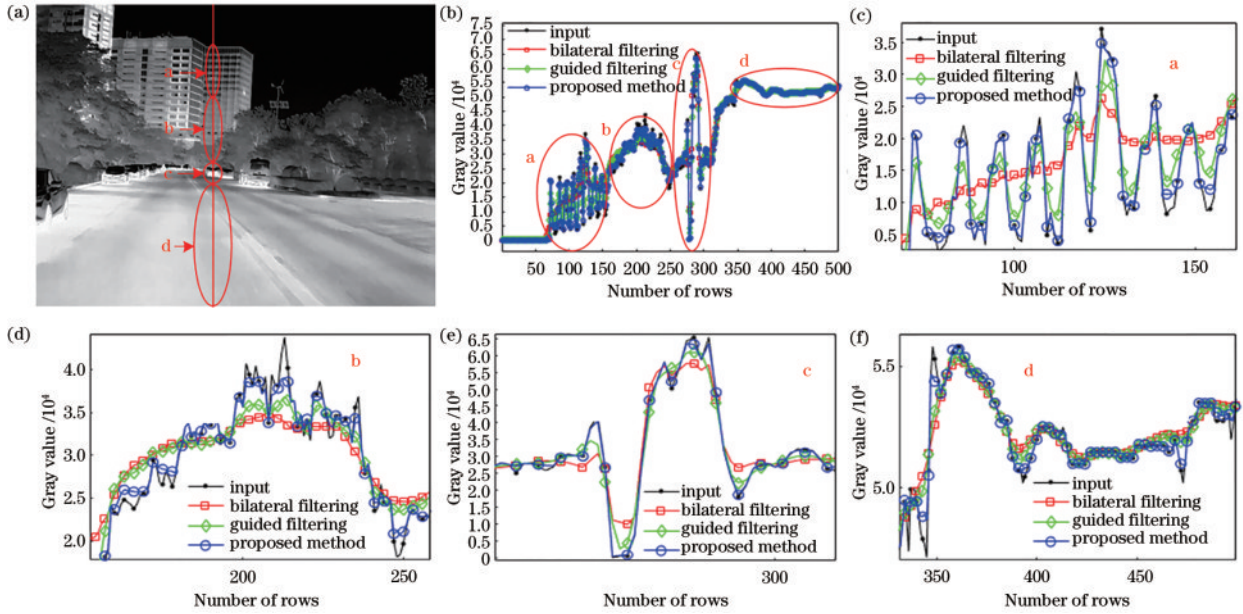


图 6 双边滤波、引导滤波及所提方法的滤波结果。(a) 含有边缘区域的红外图像;(b) 红外图像第 284 列及滤波后的数据曲线;
(c) a 区域的放大;(d) b 区域的放大;(e) c 区域的放大;(f) d 区域的放大

Fig. 6 Filtering results of bilateral filtering, guided filtering, and proposed method. (a) Infrared image containing edge area; (b) curve of data in the 284th column of infrared image and filtered results; (c) enlargement of area a; (d) enlargement of area b; (e) enlargement of area c; (f) enlargement of area d

度,但会使占少量像素灰度级压缩丢失,由于平台阈值固定,对不同场景适应性较低。因此,对基础分量的处理既要提升占多数像素灰度级对比度,又要保留占少量像素灰度级的信息。

本文设计了自适应阈值的平台直方图法,首先对基础分量直方图进行统计,表达式为

$$P(I_k) = n_k, \quad (9)$$

式中: n_k 为灰度级等于 I_k 的像素个数。然后,对 P 中不为零的数值进行统计,表达式为

$$F(l) = P(k), \quad l = 1, 2, 3, \dots, L, \quad (10)$$

式中: $P(k)$ 为 P 中第 l 个不为零的值; L 为 P 中不为零的数据的个数。接着,对 F 由小到大进行排序,并取中值,有

$$T_h = \text{Median}(F), \quad (11)$$

式中: $\text{Median}(\cdot)$ 为先排序后取中值操作; T_h 为平台直方图的阈值。选取直方图统计非零值的中值为阈值,可以使阈值位于占多数像素灰度级和占少量像素灰度级之间,在提升图像对比度和保留细节信息之间达到最佳平衡。之后,对图像直方图分布进行剪切,表达式为

$$H(l) = \begin{cases} T_h, & P(l) > T_h \\ P(l), & P(l) \leq T_h \end{cases}, \quad (12)$$

式中: $H(l)$ 为剪切后的直方图分布。那么累计分布函数为

$$\text{CDF}(x) = \begin{cases} H(0)/N, & x = 0 \\ \sum_{i=0}^x H(i)/N, & x \neq 0 \end{cases}, \quad (13)$$

式中: N 为剪切后像素总数。基本分量的重新投影可以表示为

$$I_{BP} = \text{CDF}(I_B) \times R_B, \quad (14)$$

式中: R_B 为输出动态范围; I_{BP} 为压缩后的基础分量。分别用自动增益控制、直方图投影、平台直方图及所提方法对基础分量进行压缩处理,结果如图 7 所示。

图 7(a)~(d)为基础分量压缩结果及其直方图,可以看出:图 7(a)中,自动增益控制法使占多数像素灰度级的建筑、树叶对比度较低;图 7(b)中,直方图投影法有效保留占少量像素灰度级的屋顶细节,但使建筑、树叶对比度降低;图 7(c)中,平台直方图法有效提升整体对比度,但屋顶细节信息完全丢失;图 7(d)中,所提方法既保留屋顶细节又提升建筑、树叶对比度,两者实现最佳平衡。在自动增益控制和直方图投影法的直方图中,少量像素占了较大的灰度级,说明保留占少量像素灰度级的屋顶细节后,占多数像素灰度级的建筑、树叶的对比度被压缩。平台直方图法的直方图中,几乎没有占少量像素的灰度级,说明该方法最大程度提高了建筑、树叶信息的对比度,屋顶细节信息完全丢失。这与压缩结果的分析保持一致。

2.3 细节分量处理及融合

细节分量包含低动态范围的高频信息,在进行增强拉伸的同时,需要避免背景噪声放大。

根据平坦和边缘处的双边滤波器特点,设计了一种自适应增益方法。由式(3),当滤波窗口大小、空间和值域尺度系数设定后,滤波核权重由滤波窗口内灰度值之间的差异决定。平坦区域滤波窗口各点灰度

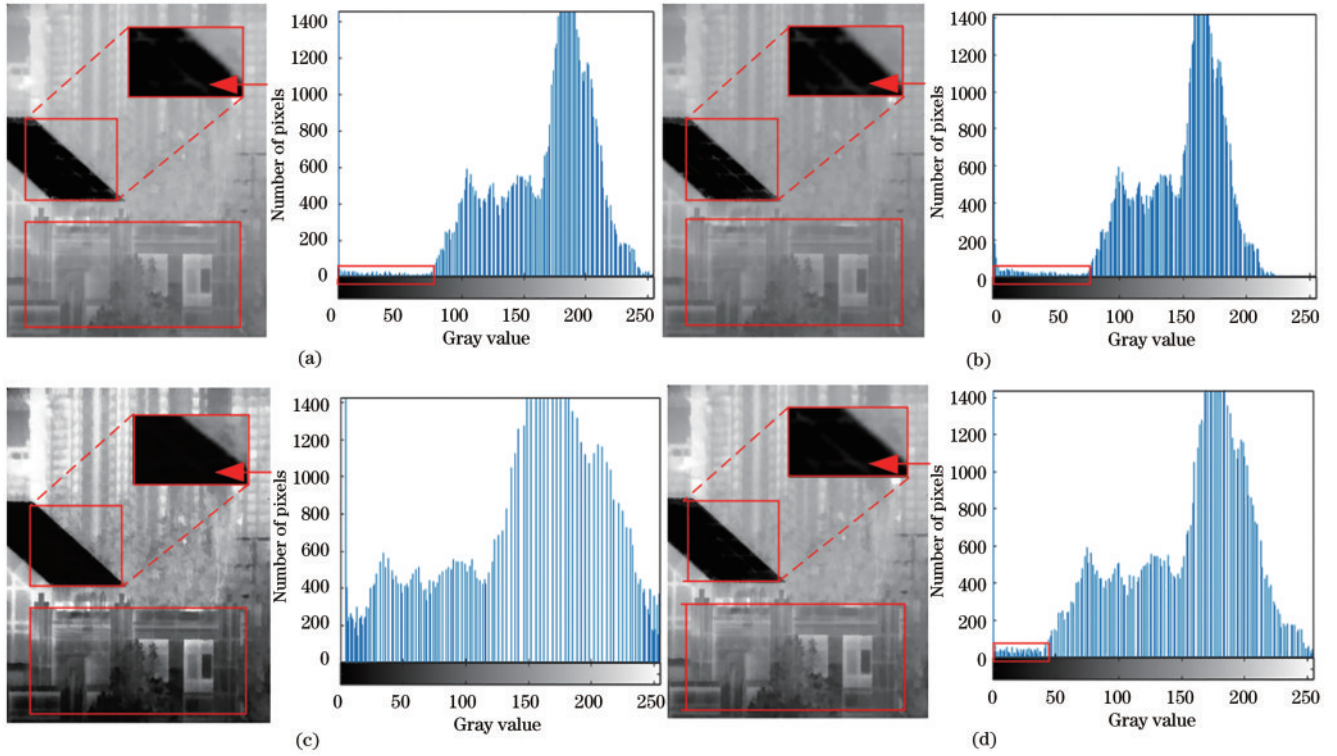


图7 基础分量处理结果及直方图。(a)自动增益控制;(b)直方图投影;(c)平台直方图;(d)所提方法

Fig. 7 Basic component processing results and their histograms. (a) Automatic gain control; (b) histogram projection; (c) platform histogram; (d) proposed method

值与中心点近似,计算权重较大,相反,边缘区域的权重较小。本文用滤波核中心点权重与滤波核权重之和的比值来判断是否为平坦背景区域,计算公式为

$$k(i, j) = w_r(i, j) / \text{sum}(w_r), \quad (15)$$

式中: (i, j) 为滤波窗口中心点; $\text{sum}(w_r)$ 为滤波核权重之和; $k(i, j)$ 为待求比值系数,平坦区域接近于0.11,边缘区域接近于1,将其归一化到(0, 1)。假定细节分量增益范围为 a 到 b ,在图像平坦区域增益较低,避免背景噪声放大,边缘区域增益较高,增强边缘细节,相关公式为

$$G(i, j) = a + k(i, j) \cdot b, \quad (16)$$

式中: $G(i, j)$ 为图像 (i, j) 点的细节分量自适应增益系数; a 值取1, b 值取4.5时效果最佳。

$$I_{DP} = G \cdot I_D, \quad (17)$$

式中: I_{DP} 为处理后的细节分量; \cdot 为点乘操作。最后,对处理后的基础分量和细节分量进行融合,采用加权线性融合方式,即

$$I_{out} = \rho \times I_{BP} + (1 - \rho) \times I_{DP}, \quad (18)$$

式中: I_{out} 为输出结果; ρ 为融合系数,取0.85时效果最佳。

3 实验结果及分析

为了验证所提方法的压缩增强效果,对4种典型场景的16 bit红外图像进行处理,像素大小为 320×256 。所涉及参数: $r = 3$ 、 $\delta_s = 7$ 、 $\delta_r = 0.3$ 、 $a =$

1、 $b = 4.5$ 、 $\rho = 0.85$ 。对所提方法与AGC、PE、BF&DDE、GF&DDE、FGF&DDE方法的效果进行对比,通过主观定性和客观定量分析来验证所提方法的有效性。

图8是含有强边缘场景效果对比图,该场景含有温差较大强边缘、左侧低对比度显示器、墙背景边缘。可以看出:AGC法处理的图像中,人脸细节丢失,显示器区域较暗;PE法提升图像整体对比度,局部过增强产生噪声;BF&DDE效果较好,但在强边缘处存在梯度反转伪影;GF&DDE和FGF&DDE在强边缘处产生光晕,局部存在过增强噪声;所提方法避免了梯度反转伪影和光晕现象,同时,在提升对比度和避免噪声之间达到最佳平衡。

图9是含有低对比度细节场景效果对比图,该场景包含建筑、树叶及屋顶细节。可以看出:AGC法保留少量像素灰度级的屋顶细节,占多数像素灰度级的建筑、树叶对比度较低;PE法有效提升整体对比度,但屋顶细节丢失,下侧局部区域偏暗;BF&DDE、GF&DDE和FGF&DDE有效保留屋顶细节,但建筑、树叶信息模糊;所提方法既提升建筑、树叶区域对比度,又在一定程度上保留了屋顶细节。

图10是含有噪声的天空背景场景效果对比图,该场景包含天空区域、路边树木及建筑。可以看出:AGC处理的部分区域树干细节丢失,建筑上的天空处含有微弱噪声,说明原始数据存在微弱噪声;PE在天

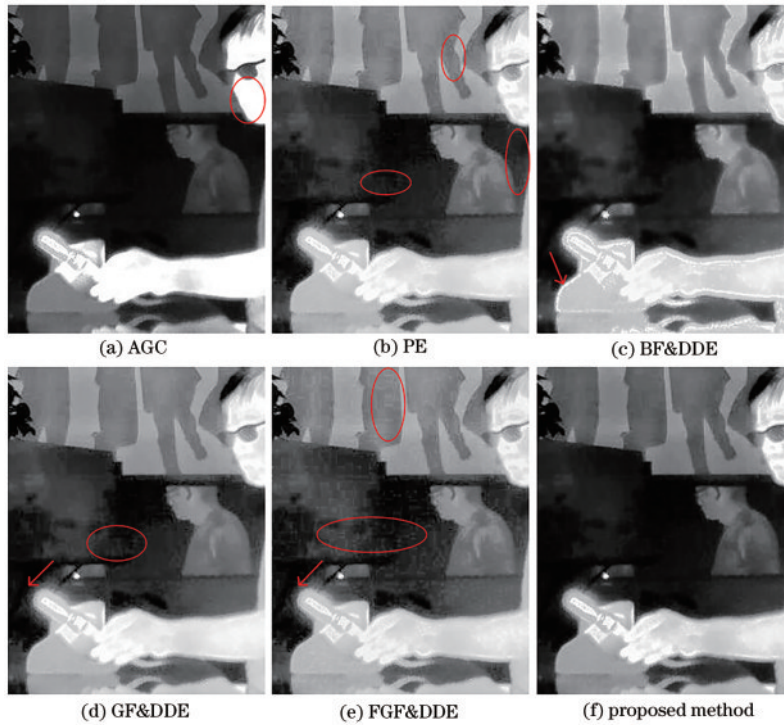


图 8 不同方法对含有强边缘场景处理的结果

Fig. 8 Results processed by different methods for scenes with strong edges

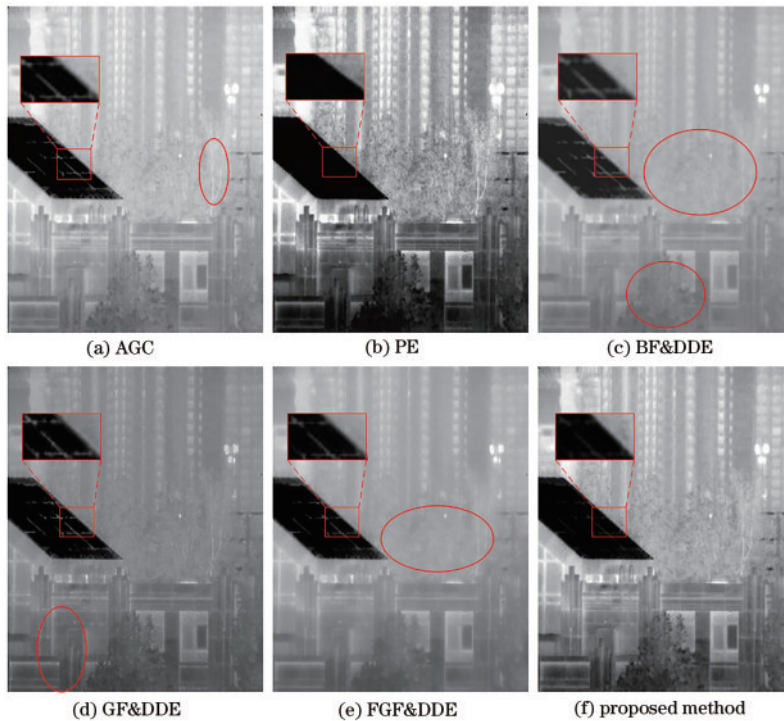


图 9 不同方法对含有低对比度细节场景处理的结果

Fig. 9 Results processed by different methods for scenes with low contrast details

空区域产生过增强噪声;FGF&DDE较PE产生的噪声更多,说明 FGF&DDE除平台直方图引入的噪声外,在细节处理部分增强了噪声;BF&DDE和GF&DDE在一定程度上也增强背景噪声;所提方法处理的图像中,天空区域噪声分布与AGC的一致,说明在处理细节分量时,有效避免了噪声放大。

图 11 是含有高动态范围场景效果对比图,该场景包含天空区域、车辆、田地及高温着火点。可以看出:AGC处理的图像中,高温区域过饱和,低温田地区域较暗,整体对比度较低;PE和FGF&DDE有效提升田地区域对比度,右下侧高温区域过饱和,PE处理的图像中天空过增强形成冲刷效应;BF&DDE方法有效保

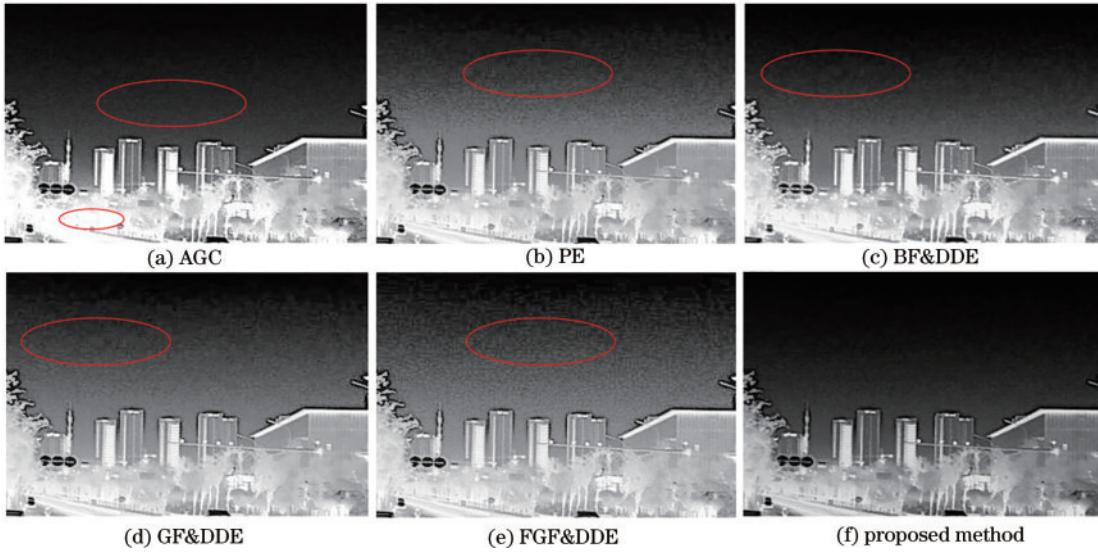


图 10 不同方法对含有噪声的天空背景场景处理的结果

Fig. 10 Results processed by different methods for sky background scene with noise

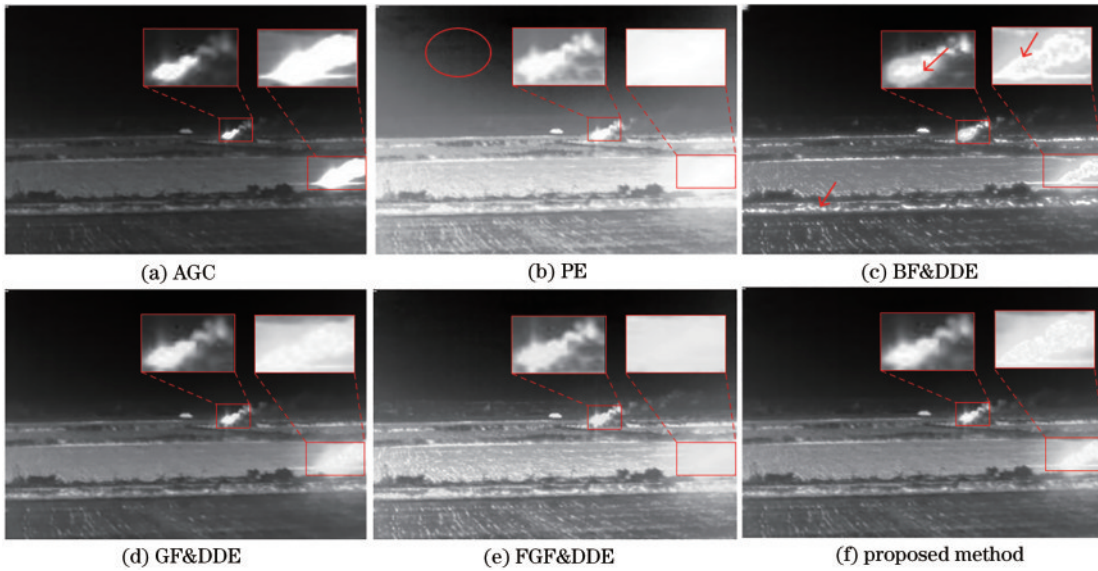


图 11 不同方法对含有高动态范围场景处理的结果

Fig. 11 Results processed by different methods for scenes with high dynamic range

留了高温区域和田地动态范围的灰度级,但在强边缘处产生梯度反转伪影,局部田地区域过饱和;GF&DDE处理的图像中,田地区域对比度较低;所提方法提升了田地区域的对比度,保留了高温区域细节信息,避免了背景噪声放大,图像更加自然。

结合以上分析结果,所提方法可以避免梯度反转伪影和光晕效应,提升图像对比度,保留细节信息,同时又能抑制背景噪声放大,图像主观效果更好。

传统图像评价指标,包括对比度、平均梯度、信息熵等,计算值易受图像过饱和区域和噪声影响,不适用于对本文场景图像进行客观定量分析。而对比度增强测量(EME)可以在一定程度上反映图像对比度,其值越大,图像对比度越高,信息越丰富,计算公式为

$$E_{ME} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k 20 \ln \frac{\max(X_i)}{\min(X_i)}, \quad (19)$$

式中: X_i 为第*i*个图像子块; k 为图像中不重叠子块总数。4种场景增强结果的EME值如表1所示。可以看出:所提方法增强结果的EME值都较高;图9场景中,

表 1 测试图像的 EME 值比较

Table 1 EME results for the test images

Method	Fig. 8	Fig. 9	Fig. 10	Fig. 11
AGC	14.41	13.07	19.87	12.57
PE	17.83	19.59	17.68	15.33
BF&DDE	18.54	13.45	20.39	17.46
GF&DDE	17.36	13.04	18.65	13.36
FGF&DDE	18.13	11.87	21.64	15.77
Proposed method	19.58	16.01	21.65	15.14

PE 法提升对比度效果最好,其 EME 值最大;图 11 场景中,BF&DDE 法增强效果中存在局部区域过饱和,其相应的 EME 值较大,与前面定性分析结果一致。这进一步说明所提方法在提高对比度和保留细节信息之间实现了最佳平衡。

4 结 论

设计了一种基于边窗滤波的红外图像压缩增强方法。实验结果表明:边窗滤波对强边缘保边效果更好,可以有效避免梯度反转伪影和光晕效应;采用自适应阈值的平台直方图方法处理基础分量时,既能提高对比度,又能避免低灰度级微弱细节丢失;自适应增益的细节分量处理方法在增强细节信息同时,有效避免背景噪声放大。通过对典型场景的测试结果进行分析,所提方法能有效避免梯度反转伪影,细节信息更丰富,抑制噪声能力更强,对不同场景的适应性更好。同时,所提方法中边窗滤波处理过程较复杂,为满足实际工程项目中对实时性的要求,接下来,将从算法精简优化和并行计算两个方向进行研究。

参 考 文 献

- [1] 王园园, 赵耀宏, 罗海波, 等. 海面红外图像的动态范围压缩及细节增强[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(1): 0126003.
Wang Y Y, Zhao Y H, Luo H B, et al. Dynamic range compression and detail enhancement of sea-surface infrared image[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(1): 0126003.
- [2] 侯义锋, 丁畅, 刘海, 等. 逆光海况下低质量红外目标的增强与识别[J]. 光学学报, 2023, 43(6): 0612003.
Hou Y F, Ding C, Liu H, et al. Enhancement and recognition of infrared target with low quality under backlight maritime condition[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(6): 0612003.
- [3] 王彬, 高嘉平, 司聿涛. 基于卷积神经网络的图像分类及应用[J]. 电子与封装, 2021, 21(5): 050503.
Wang B, Gao J P, Si S T. Image classification and application based on convolutional neural network[J]. Electronics & Packaging, 2021, 21(5): 050503.
- [4] Zhou B, Luo Y, Yang M, et al. An improved adaptive detail enhancement algorithm for infrared images based on guided image filter[J]. Journal of Modern Optics, 2019, 66(1): 33-46.
- [5] 李家琨, 金伟其, 张旭, 等. 气体泄漏红外图像动态压缩及增强方法[J]. 光学学报, 2017, 37(1): 0111003.
Li J K, Jin W Q, Zhang X, et al. Gas leak infrared image dynamic compression and enhancement method[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(1): 0111003.
- [6] 温海滨, 毕笃彦, 马时平, 等. 消除阶梯效应与增强细节的变分 Retinex 红外图像增强算法[J]. 光学学报, 2016, 36(9): 0911005.
Wen H B, Bi D Y, Ma S P, et al. Variational retinex algorithm for infrared image enhancement with staircase effect suppression and detail enhancement[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(9): 0911005.
- [7] Zhou Y K, Zhu Y P, Zeng B G, et al. Review of high dynamic range infrared image enhancement algorithms[J]. Laser Technology, 2018, 42(5): 718-726.
- [8] Liu T T, Jiang Y D, Ding W Y, et al. A new high-dynamic-range compression and detail enhancement algorithm for infrared images[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 427/428/429: 1813-1816.
- [9] Zhang X J, Fan D Y. Infrared image dynamic range compression and contrast enhancement study[J]. Laser Journal, 2020, 41(6): 76-79.
- [10] Vickers V E. Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery[J]. Optical Engineering, 1996, 35(7): 1921-1926.
- [11] Zhang F F, Xie W, Ma G R, et al. High dynamic range compression and detail enhancement of infrared images in the gradient domain[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 67: 441-454.
- [12] Fan Y J, Jin W Q, Liu B, et al. An analysis of digital detail enhancement (DDE) technology developed by FLIR [J]. Infrared Technology, 2010, 32(3): 161-164.
- [13] Branchitta F, Diani M, Corsini G, et al. New technique for the visualization of high dynamic range infrared images [J]. Optical Engineering, 2009, 48(9): 096401.
- [14] Zuo C, Chen Q, Liu N, et al. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images[J]. Optical Engineering, 2011, 50(12): 127401.
- [15] Liu N, Zhao D X. Detail enhancement for high-dynamic-range infrared images based on guided image filter[J]. Infrared Physics & Technology, 2014, 67: 138-147.
- [16] Chen Y H, Kang J U, Zhang G P, et al. Real-time infrared image detail enhancement based on fast guided image filter and plateau equalization[J]. Applied Optics, 2020, 59(21): 6407-6416.
- [17] Shan R Q, Li B, Han W, et al. Display and detail enhancement for high-dynamic-range infrared images[J]. Optical Technique, 2019, 45(4): 475-481.
- [18] 汪伟, 许德海, 任明艺. 一种改进的红外图像自适应增强方法[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11): 20210086.
Wang W, Xu D H, Ren M Y. An improved infrared image adaptive enhancement method[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11): 20210086.
- [19] Yin H, Gong Y H, Qiu G P. Side window filtering[C]//2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 15-20, 2019, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2020: 8750-8758.
- [20] Tomasi C, Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Sixth International Conference on Computer Vision, January 7, 1998, Bombay, India. New York: IEEE Press, 2002: 839-846.
- [21] He K M, Sun J, Tang X O. Guided image filtering[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(6): 1397-1409.